

상용관 마찰계수에 따른 관망해석 Pipe Network Analysis according to Friction Factor of Commercial Pipe

유 동 훈* · 원 유 승** · 윤 계 섭***
Yoo, Dong Hoon · Wun, Yoo Seung · Yoon, Kye Sup

Abstract

Studied are the existing equations of Hazen-Williams and Colebrook-White, and the equations of Yoo's (1995) mean zero velocity point and mean friction factor developed for the estimation of commercial pipe friction factor. Simple arrangements of pipe network are devised by changing the diameter, flow discharge and length, and the characteristics of four equations are investigated by comparing the computed results of pressures at each node. Three groups of pipe diameter, small, medium, large, are considered in the comparison, and various problems of existing equations are discussed based on the computed results of pressures and velocities.

요 지

상용관 마찰계수 산정을 위해 개발된 기존의 Hazen-Williams 식, Colebrook-White 식과 유동훈(1995)이 제안한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 산정식들을 비교 검토하였다. 간단한 관망에 대하여 관종류, 관경, 유속, 관길이를 변화시켜 수리조건을 구성하였으며, 네가지 상용관 마찰계수 산정식을 적용하여 구한 압력차이를 비교하여 각각의 산정식들이 가지는 특징을 논하였고, 입력자료의 변화에 따라 마찰손실이 어떠한 거동을 하는지 알아보았다. 관경을 소형관 및 대형관으로 변화시켰을 때의 분석결과와 중형관일 때의 분석결과를 세 종류의 강관에 대하여 비교하였고, 유속 변화와 압력 변화와의 비교를 통하여 기존 상용관 마찰계수 산정식의 문제점에 대하여 논하였다.

* 아주대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 아주대학교 토목공학과 석사과정
*** (주) 대우엔지니어링 환경사업부 전무

1. 서 론

관의 종류, 크기 및 접합상태는 관망의 각 관로에서 손실수두에 상당한 차이를 유발하며 관로손실은 각 절점에서 압력의 차이를 가져오고, 압력의 차이는 실제 관망설계시 펌프의 용량을 결정하는데 상당한 영향을 미친다. 그러므로 정확한 관마찰계수의 산정은 필요 이상의 펌프 설치를 막을 수 있고 적절한 곳에 펌프장을 설치함으로써 경제성을 높일 수 있으며, 적절한 압력을 유지시킴으로써 누수를 줄일 수 있을 것이다.

관마찰계수를 계산하기 위한 경험공식 중 Hazen-Williams 식은 직경 5 cm 이상의 비교적 큰 관이고 유속은 3 m/s 이하인 경우에 대해서 개발하여 미국 상수도 시스템 설계에 많이 사용되어 온 공식으로 관망해석에 폭 넓게 쓰이고 있다. 그러나 Hazen-Williams 식은 전대수지상에 도시하면 직선분포를 보이는데 관경이 크거나, 유속이 빨라지면 마찰손실을 과소 산정할 우려가 있으며, Swanson과 Reed(1963)는 대구경관의 경우 Hazen-Williams 경험계수를 크게 정해야함을 실험결과로 밝힌 바 있다. 또한 Colebrook 자료분석 결과, 등가조고가 관경과 상당히 밀접한 관계가 있는 것으로 나타난 반면 Hazen-Williams 식은 동점성계수와 관경에 대한 고려가 어렵다는 취약점이 있다. 이러한 취약점을 보완하는 방법으로 경험계수의 선택이 중요하나 이론적 근거가 충분하지 못하고 경험에 의해 산정되었기 때문에 적용범위에 상당한 제약이 따른다.

Colebrook-White 식은 어느 정도 이론에 근거하나 식의 양변에 마찰계수항이 있어 시산해야 한다는 단점과 난류와 전난류의 단순한 조합에 의해 식이 만들어졌으며 등가조고를 단순히 평균하여 제시하였기 때문에 대구경관일 경우에 과대 산정할 우려가 있다. 최근 Colebrook-White 식의 마찰계수를 양해법으로 해석하는 근사식이 여러 종류 개발되었으나, Colebrook-White 식에 내포된 근본적 모순을 갖고 있기 때문에 등가조고 산정에 어려움이 많다. 또한 조면 분포율의 합이 200 %가 되는 근본적인 모순을 갖고 있는 Colebrook-White

식은 상용관 마찰계수 분포 특징을 충분히 반영할 수 없는 것으로 사료된다.

유동훈(1995)에 의해 제안된 상용관 마찰계수 산정법인 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 상용관 내 조고가 불균일하다는 점과 불균일한 여러 조면의 분포율이 다를 것이라는 가정하에 등가조고와 분포율을 모두 변수로 취함으로써, Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식의 단점을 보완하였다. 유동훈과 한상호(1996)는 수리실험에서 상용관 접합조고를 재현하여 유동훈(1995)의 마찰계수 평균법이 우수함을 입증하였으며, 상용관이라도 접합되지 않은 관의 마찰계수 분포는 균일조도관의 마찰계수 분포형태를 가짐을 확인하였고, 완난류-천이난류의 경계조건으로부터 매끈한 면의 등가조고를 산정하였다. 또한 유동훈과 원유승(1995)은 상용관 마찰계수 산정법의 적합성을 입증하기 위해 Colebrook(1938)이 수집한 자료를 재분석하여, 조면의 분포율과 등가조고를 산출하였다.

본고는 이상의 Hazen-Williams 식, Colebrook-White 식과 영점높이 평균법, 마찰계수 평균법 등 네가지 산정식에 의해 구한 유량, 압력 등을 비교하여 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법이 가지는 특성에 대하여 논하였으며 같은 관망에 대하여 관길이, 관경, 유량, 관종류를 달리하였을 때 등가조고의 변화를 고려하여 상기 식들의 결과가 어떠한 차이를 보이는지 알아 보고, 현재 많이 쓰이고 있는 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식으로 산정된 결과가 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법으로 산정된 결과와의 차이점을 비교, 고찰하였다.

2. 마찰계수 산정법

관망설계시 설계 주안점은 각 절점에서 요구 유량 및 압력을 적정 수준에서 유지시키는 것이며, 유량과 압력에 크게 영향을 미치는 것이 마찰손실수두 h_f 이다. 이는 다음의 Darcy-Weisbach 식으로 산정된다.

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

여기서 f 는 마찰계수, l 은 관길이, d 는 관경, V 는 평균유속, g 는 중력가속도이다. 식 (1)에 제시된 바와 같이 마찰손실수두는 각 관의 특성제원과 마찰계수에 의해 결정되며 상용관 마찰계수를 구하는 방법으로 Hazen-Williams 식, Colebrook-White 식 등의 기존 식과 유동훈(1995)이 제안한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법 등이 있다. 이에 네 가지 식들을 간단히 제시하여 비교하였고, 본고는 이들 마찰계수 산정식을 사용하여 동일 입력자료에 대입하여 관망해석을 수행하였으며, 해석결과를 비교하여 각 식들이 가지는 특징을 논의하였다.

2.1 Hazen-Williams 식

Hazen-Williams 식은 전술한 바와 같이 관경과 유속의 제한이 있음에도 불구하고 수식의 형태가 간단하기 때문에 상수도 설계 시스템에 많이 사용되어 왔다. 이는 대형관이나 소형관의 경우 충분한 신뢰성을 갖는 마찰계수 산정식이 없어 경험계수의 조정에 의해 사용된 것으로 판단된다. Hazen-Williams 식은 평균유속을 바로 산정하는 식으로 다음과 같다.

$$V = 0.849 C_{HW} H^{0.63} S^{0.54} \quad (2)$$

여기서 C_{HW} 는 Hazen-Williams 계수로서 가장 매끈한 관에서는 150, 대단히 거친 관에서는 80 정도의 값을 가지며 실제 설계를 위한 평균치로서 100을 많이 사용한다(윤용남, 1989). 즉, Hazen-Williams의 조도계수는 조고가 커지면 작은 값을 가지며, 반대로 조고가 작을수록 커진다. Hazen-Williams 식의 주요 특징은 전대지수상에 직선분포를 갖는다는 것이며 이는 유속이 빨라지거나 대형관의 경우 마찰계수가 작아지므로 경험계수 C_{HW} 를 크게 하여야 하며 소형관($d < 2.5\text{cm}$)에서는 과대산정, 중형관($2.5\text{cm} < d < 1\text{m}$)에서는 과소산정할 우려가 있다. 또한 관경을 거의 고려치 않기 때문에 어느 관에서는 과대 또는 과소산정할 수 있는 문제점을 가지고 있으며, 관의 종류에 따른 경험계수의 선택에도 주의가 요망된다.

2.2 Colebrook-White 식

Colebrook은 자신이 수집한 자료들로부터 상용관 마찰계수 산정식을 완난류와 전난류의 1:1 조합으로 산정할 것을 제안하였으며 이는 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

식 (3)에 제시된 바와 같이 양변에 \sqrt{f} 항이 있어 시산해야 하는 단점을 가지고 있다. 여러 연구자가 식 (3)을 양해법으로 산정하는 근사식을 개발하였는데, 그 중 Barr(1981)는 다음과 같은 형태의 양해법 산정식을 제안하였다(Featherstone과 Nalluri, 1988).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log \left[\frac{k_s}{3.7d} + \frac{5.02\log(R/4.519 \log(R/7))}{R(1+R^{0.52}/29(d/R)^{0.7})} \right] \quad (4)$$

유동훈과 원유승(1995)은 Colebrook(1938) 자료를 재분석해 본 결과 중형관의 경우에는 제안된 등가조고를 사용하여 어느 정도 정확성을 가지고 있으나 Hazen-Williams식과 마찬가지로 소형관과 대형관에서는 거의 맞지 않음을 확인하였다. Colebrook-White는 식이 적용되는 구간에 제한을 두지 않기 위해 각 관 등가조고(k_s)의 평균치를 제시하는 오류를 범하였으며, 관경에 따라 분포율이 달라질 수 있음을 고려하지 않았다. 더욱이 Colebrook-White 식은 수식 전체 시 거친 면의 분포율도 100%, 매끈한 면의 분포율도 100%로 가정하여 영점높이를 산정하였기 때문에 논리적인 모순을 갖고 있다.

2.3 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법

상용관 마찰계수를 산정하기 위해 유동훈(1995)은 상용관내 조고는 불균일하다고 파악하였으며, 불균일 조고에 의해 매끈한 면과 거친 면의 분포율이 관경, 관의 종류와 관의 연결방법에 따라 서로

다를 것이라 판단하였다. 이에 따라 상용관 마찰계수는 각각의 수리조건에 의하여 결정되며, 이들 수리조건 전체를 대표하는 마찰계수를 평균하여 구하는 방법으로 분포율 개념을 도입한 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법을 제안하였다.

영점높이의 평균치는 다음의 식 (5)로 산정된다.

$$\delta_m = P_s \delta_s + P_r \delta_r \quad (5)$$

여기서 δ_m 은 평균 영점높이, δ_s 는 매끈한 면의 영점높이, δ_r 은 거친 면의 영점높이, P_s 는 매끈한 면의 분포율, P_r 은 거친 면의 분포율이다. 이 방법에 의한 마찰계수 산정은 식 (5)에 의해 평균 영점높이를 산정한 후 영점높이를 도입한 다음과 같은 대수분포 적분식(Prandtl, 1925)으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k} \left(\ln \frac{d_k}{\xi} - 2.19 \right) \quad (6)$$

여기서 ξ 는 영점높이비(δ_m/k_s)이며, d_k 는 조고비(d/k_s)이다.

이에 반해 마찰계수 평균법은 매끈한 면의 마찰계수와 분포율, 거친 면의 마찰계수와 분포율로부터 산정되며 다음과 같다.

$$C_m = P_s C_s + P_r C_r \quad (7)$$

여기서 C_m 은 평균 마찰계수, C_s 는 매끈한 면의 마찰계수, C_r 은 거친 면의 마찰계수, P_s 는 매끈한 면의 분포율, P_r 은 거친 면의 분포율이며, $P_s + P_r = 1$ 이다.

유동훈(1993a, b)은 조고비와 레이놀즈수에 따라 마찰흐름 조건을 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯개 구간으로 나누는 조건식을 개발한 바 있으며, 각 수리조건에 따라 마찰계수를 양해법으로 산정하는 근사식을 개발하였다. 또한 유동훈과 강기훈(1995)은 각 수리조건 구간별로 영점높이를 산정하는 양해법 산정식을 개발하였다. 이상의 연구결과는 표 1에 정리하여 제시하였다. 한편 유동훈과 한상호(1996)는 Galvanized-Iron

Pipe에 대한 실험을 수행하여 매끈한 면의 등가조고가 0.032 mm임을 밝혔으며, 매끈한 면도 작지만 무시할 수 없을 정도의 조고가 있음을 확인하였다. 거친 면의 등가조고는 다음 절에 논의된 바와 같이 Colebrook(1938) 자료를 재분석하여 산정하였다.

2.4 상용관 등가조고

상용관의 마찰계수 분포는 Nikuradse(1932, 1933)의 균일조고 원형관 실험결과와 상당히 다른 양상을 보이며 이는 Colebrook(1938)이 수집한 자료에 잘 나타나 있다. 이에 따라 Colebrook 자료를 재분석하였으며, 분석된 결과는 등가조고와 분포율이 관경과 밀접한 관계가 있으며, 관의 종류에도 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

등가조고와 분포율 산정식은 크게 αd , $\beta d + \gamma$, $\exp(-d/d_s + \epsilon)$ 등의 세가지 형태로 구분되며 각각의 상수 α , β , γ , ϵ 와 기준관경 d_s 는 관경에 따른 분류 즉, 2.5 cm 이하의 소형관, 1 m 이하의 중형관, 1 m 이상의 대형관에 따라 다른 값을 가지는 상수이고, d 는 관경이다. 유동훈과 원유승(1995)은 마찰계수 평균법에 의해 각 계수를 산정하였으며 산정된 각각의 상수는 표 2에 제시되어 있다.

표 2에서 소형관의 경우 등가조고 산정식의 형태가 다른데 Galvanized-Iron Pipe의 경우는 일정한 수치인데 반하여 Wrought-Iron Pipe는 관경에 비례하는 것으로 산정된다는 점에 주의를 요하며 영점높이 평균법에 의한 등가조고와 분포율의 산정도 표 2에 따라 계산되어 관망해석에 적용하였다.

매설된 상수도관은 물의 온도 변화가 기상의 영향을 덜 받지만 여름과 겨울 등의 계절적 영향은 무시할 수 없을 것으로 판단되어 동점성계수(kinematic viscosity)는 유동훈(1995)의 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\nu = \nu_N \left[a + \frac{b}{M+c} \right] \quad (8)$$

여기서 ν_N 은 기준절대온도 N에서의 동점성계수이며, 물의 경우 N은 293.2 K이고 ν_N 은 $10^{-6}(\text{m}^2/$

s)이다. 상관계수 a, b, c는 각각 -0.140, 0.190, 즉, $M=(273.1+t)/N$ 이며, t는 물의 온도(°C) -0.833이고, M은 절대온도 대 기준 절대온도의 비 이다.

표 1. 관미찰계수 산정식과 영점높이비 산정식

구 분	마찰계수 양해법 산정식 (유동훈, 1993b)	영점높이비 산정식 (유동훈과 강기훈, 1995)
경 제 조 건	$d_k = d/k_s$ $R_{ST} = 81.5d_k$ $R_{TR} = 1440d_k$	$\xi = \delta_m/k_s$ $R_{ST} = 81.5d_k$ $R_{TR} = 1440d_k$ $\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k}(\ln \frac{d_k}{\xi} - 2.19)$
총 류 $R < 2100$	$C = 8R^{-1}$	$\xi = \text{EXP}(\ln d_k - kC^{-0.5} - 2.19)$ (가상)
천 이 총 류 $2100 < R < 4000$ $50 < d_k$	$C = 0.00186 \ln R - 0.0104$	-
완 난 류 $4000 < R < R_{ST}$ $50 < d_k$	$C = \text{EXP}(6.72R^{-0.1} - 8.23)$	$\xi = 0.57 d_k R^{-0.87}$
천 이 난 류 $R_{ST} < R < R_{TR}$ $50 < d_k$	$C = C_R - C_A \cos \left[\frac{\ln R - \ln d_k - 5.07}{1.757 - 0.127 \ln d_k} \right]$ $C_A \leq 0.075 d_k^{-0.5}$ $C_R = \text{전 난 류에서의 } C$	for $50 < d_k < 200$ $\xi_M = \text{EXP}[-3.984 + 0.0183 \sin 3.254 d_k^{0.25}]$ $R_M = \text{EXP}[-56 d_k^{-0.7} + 11.9]$ for $200 < d_k$ $\xi_M = 0.01 d_k^{0.1}$ $R_M = 110 d_k^{1.1}$ $\xi = \text{EXP}(A - B \cos D)$ $A = 0.5 \ln(\xi_M \xi_R)$ $B = \ln \xi_R - A$ $D = \pi \frac{\ln R - \ln R_M}{\ln R_{TR} - \ln R_M}$
전 난 류 $R_{TR} < R$ $50 < d_k$	$C = C_R = \left(\frac{k}{\ln d_k + 1.21} \right)^2$	$\delta = \delta_R = \frac{1}{30}$
천 이 류 $2000 < R < R_{TR}$ $d_k < 50$	$C = 0.0038 + (C_R - 0.0038) \tanh[0.13 \beta \sqrt{d_k}]$ $\beta = \ln R - 7.6$	$\xi = 0.00017 d_k + (\xi_R - 0.00017 d_k) \tanh[0.29 \beta d_k^{0.24}]$ $\beta = \ln R - 7.6$

표 2. 마찰계수 평균법에 의한 분포율 및 등가조고 산정표

구 분	Colebrook	소 형 관 ($d < 2.5\text{cm}$)	중 형 관 ($2.5\text{cm} < d < 1\text{m}$)	대 형 관 ($1\text{m} < d$)	
Galvanized -Iron	등가조고	0.15mm	0.838mm	$\alpha = 0.033$	-
	분포율	-	$d_s = 10.0\text{mm}, \epsilon = 0.032$	$d_s = 73.5\text{mm}, \epsilon = -0.380$	-
Tar Coated Cast-Iron	등가조고	0.13mm	-	$\alpha = 0.005$	0.68mm
	분포율	-	-	$d_s = 286.5\text{mm}, \epsilon = -0.453$	$d_s = 383.1\text{mm}, \epsilon = 2.135$
Wrought -Iron	등가조고	0.04mm	$\beta = 0.084, \gamma = -0.248\text{mm}$	$\alpha = 0.025$	-
	분포율	-	$d_s = 22.9\text{mm}, \epsilon = -1.267$	$d_s = 309.6\text{mm}, \epsilon = -1.667$	-

3. 적용관망 및 검토

Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식을 이용한 Wood(1980)의 기준 [KY PIPE] 모형과 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법으로 대표 마찰계수를 산정하는 수정된 [KY PIPE]를 이용하여 미국 토목학회지에 실린 예(Wood와 Charles, 1972)의 관망에 대하여 관의 종류를 달리하여 각각의 관망에 대하여 분석하였다. 또한 관망해석에 적용된 네가지 식을 단순한 수평관에 적용하여 유속의 변화에 따른 동력의 변화를 도시하였다. Hazen-Williams 계수와 등가조고의 변화에 따라 어떠한 거동을 하는지 살펴보고, 각각의 식들의 특징을 논하였다.

3.1 적용관망

관망의 구성은 그림 1에 도시되어 있고, 각 관의 입력자료는 표 3에 제시되어 있다. Hazen-Williams 계수 C_{HW} 는 원자료에 제시된 110~130 정도이고, Colebrook-White 식을 적용할 때 등가조고는 표 2에 제시된 바와 같이 관의 종류에 따라 Galvanized-Iron Pipe는 0.15 mm, Tar Coated

Cast-Iron Pipe는 0.13 mm, Wrought-Iron Pipe는 0.04 mm를 적용하였다. 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 거칠은 면의 등가조고는 표 2에 제시된 바와 같고, 매끈한 면일 때는 완난류 조건을 적용하였으며, 분포율도 표 2에 제시된 경험식을 이용하여 산정하였다. 표 3에 제시된 입력자료는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 Tar Coated Cast-Iron Pipe에 한하여 계산된 등가조고와 분포율이며, Galvanized-Iron Pipe, Wrought-Iron Pipe의 경우도 표 2에 의해 계산하였으며 같은 관망에 적용하였다. 이 결과를 대입하고 각 관에 대하여 각각의 식 또는 방법에 의해 산출된 유량은 네가지 식 모두 비슷하였으며, 표 3에 제시된 입력자료를 적용하여 관로에 흐르는 유량을 표 4에 나타내었다. 표 4에 제시된 바와 같이 Hazen-Williams 식의 경우 Colebrook-White 식, 영점높이 평균법, 마찰계수 평균법에 비해 약간의 유량 차이가 있음을 확인할 수 있었으며, 이런 현상은 관 종류, 관경, 유속의 변화에 관계없이, 적용한 모든 관망에 대하여 유사한 결과를 주었다. 이로부터 각 관로를 흐르는 유량은 관경의 영향을 많이 받고, 압력 변화는 마찰계수 차이에 의해 생기는 손실량에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

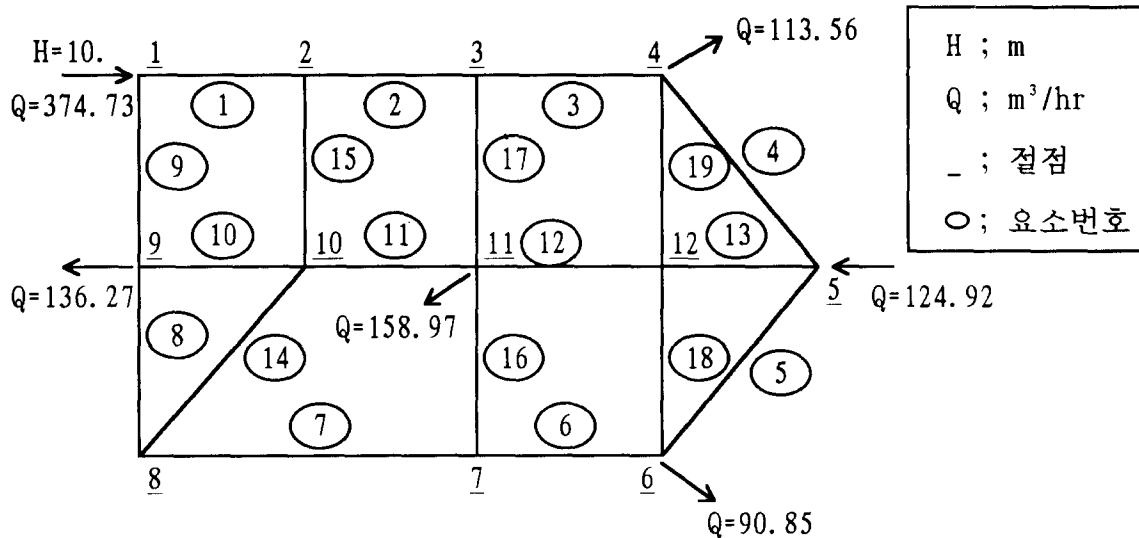


그림 1. 적용관망의 구성도

표 3. 적용관망의 입력자료

요소 번호	절점번호		요소길이 (m)	C _{HW}	등가조고(mm)		매끈한면의 분포율	관경 (cm)
	시점	종점			Colebrook	평균법		
1	1	2	457.2	130	0.13	1.525	0.770	30.5
2	2	3	304.8	130	0.13	1.025	0.672	20.3
3	3	4	365.8	120	0.13	1.025	0.672	20.3
4	5	4	609.6	120	0.13	1.025	0.672	20.3
5	5	6	853.4	120	0.13	1.025	0.672	20.3
6	6	7	335.3	120	0.13	1.025	0.672	20.3
7	7	8	304.8	120	0.13	1.025	0.672	20.3
8	8	9	762.0	120	0.13	1.025	0.672	20.3
9	9	1	243.8	100	0.13	1.025	0.672	20.3
10	9	10	396.2	100	0.13	0.760	0.613	15.2
11	10	11	304.8	100	0.13	0.760	0.613	15.2
12	11	12	335.3	130	0.13	1.270	0.725	25.4
13	12	5	304.8	120	0.13	1.270	0.725	25.4
14	10	8	548.6	120	0.13	0.760	0.613	15.2
15	10	2	335.3	120	0.13	0.760	0.613	15.2
16	11	7	548.6	120	0.13	0.760	0.613	15.2
17	11	3	365.9	130	0.13	1.270	0.725	25.4
18	12	6	548.6	120	0.13	0.760	0.613	15.2
19	12	4	396.2	120	0.13	0.760	0.613	15.2

주 기 : Colebrook 등가조고는 가상의 대표 등가조고이며, 평균법의 등가조고는 거친면의 등가조고이다.

표 4. 표 3을 이용하여 산정된 유량의 비교

요소 번호	절점번호		유량 (m ³ /hr)				비고
	시점	종점	Haz-Will ¹⁾	Col-Whi ²⁾	MZVP ³⁾	MFF ⁴⁾	
1	1	2	218.365	200.876	201.272	201.370	
2	2	3	158.935	144.922	144.158	144.241	
3	3	4	61.511	59.857	59.562	59.566	
4	5	4	- 35.885	- 36.965	- 37.037	- 37.008	
5	5	6	32.241	31.057	31.010	31.007	
6	6	7	- 43.355	- 45.594	- 45.572	- 45.529	
7	7	8	- 48.727	- 53.989	- 54.342	- 54.317	
8	8	9	- 29.403	- 34.909	- 34.952	- 34.920	
9	9	1	-156.360	-173.844	-173.448	-173.351	
10	9	10	- 9.308	2.675	2.236	2.174	
11	10	11	30.798	39.546	39.960	39.906	
12	11	12	- 25.377	- 25.960	- 25.643	- 25.600	
13	12	5	- 56.794	- 56.898	- 56.873	- 56.905	
14	10	8	19.324	19.080	19.390	19.397	
15	10	2	-59.430	- 55.955	- 57.114	- 57.128	
16	11	7	- 5.372	- 8.399	- 8.770	- 8.788	
17	11	3	- 97.423	- 85.068	- 84.593	- 84.676	
18	12	6	15.254	14.198	14.267	14.314	
19	12	4	16.164	16.740	16.963	16.988	

주 기 : 1) Hazen-Williams 식 2) Colebrook-White 식
3) 영점높이 평균법 4) 마찰계수 평균법

3.2 절점압력의 출력결과

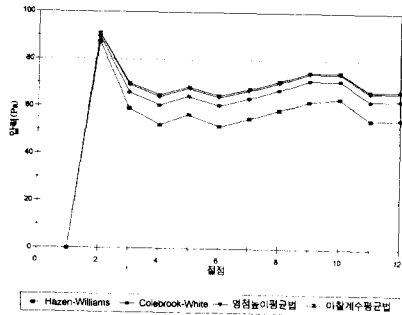
그림 1에 예시된 관망에 대하여 네가지 식들이 가지는 특징을 알아보기 위해 압력을 출력하였는데 각 절점에서의 계산된 압력은 그림 2에 도시된 바와 같다.

그림 2(a)는 Galvanized-Iron Pipe에 관하여 네가지 식 또는 방법에 의해 해석된 결과이다. 그림에 도시된 바와 같이 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우가 압력의 변화가 가장 작았으며, 표 3에 제시된 바와 같이 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 Colebrook-White 식에 비해 상대적으로 마찰손실은 가장 적은 것으로 출력되었다. 이는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법이 등가조고와 분포율 두가지 미지수의 영향을 받아 1:1 단순 조합된 Colebrook-White 식에 비해 압력의 변화가 작은 것으로 판단된다.

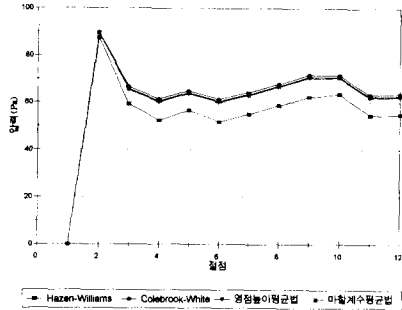
Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우에 압력변화는 그림 2(b)에 제시된 바와 같으며 다른 두 종류의 관에 비하여 각 식들에 의해 계산된 압력 차이의 폭이 가장 작았다. Hazen-Williams 식의 경

우 C_{HW}로 110~130이 적용되었고 Colebrook-White 식의 경우 등가조고는 Galvanized-Iron Pipe와 비슷한 0.13 mm가 적용되었다. Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 Galvanized-Iron Pipe에 비해 등가조고는 작으나, 조면의 분포율도 작아 압력손실이 Galvanized-Iron Pipe보다 크게 산정되었다. 즉, Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우 피복이 되어 등가조고는 작으나 매끈한 면의 분포율도 작아져 Galvanized-Iron Pipe 보다 큰 마찰손실을 유발할 것으로 판단된다.

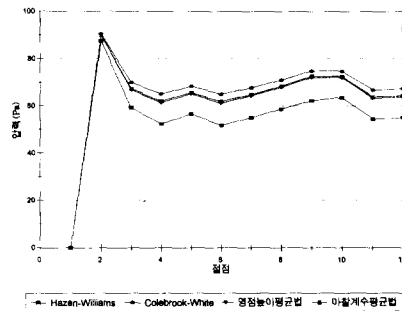
그림 2(c)에 제시된 결과는 Wrought-Iron Pipe의 경우이며, 이때 C_{HW}는 관의 종류에 관계없이 표 3에 의해 입력되었으며 Colebrook-White 식의 등가조고는 0.04 mm를 적용하였다. 이들 입력자료를 이용하여 수행된 관망해석 결과가 다른 두 종류의 관에 비해 각각의 식들에 대한 압력차가 가장 크다. 또한 Hazen-Williams 식은 C_{HW}가 130 정도이면 마찰손실이 영점높이 평균법이나 마찰계수 평균법과 거의 유사하며, 새로운 상용관 마찰계수 산정식인 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의한 관망해석은 모든 관에 대하여 압력의 차



(a) Galvanized-Iron Pipe의 경우



(b) Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우



(c) Wrought-Iron Pipe의 경우

그림 2. 적용예의 관망해석 결과 각 식으로 계산된 유량-압력과의 관계

이가 거의 일치하였다. Colebrook-White 식과 새로운 상용관 마찰계수 산정식들을 비교하며 보면 Galvanized-Iron Pipe의 경우 Colebrook-White 식에 의한 마찰손실이 크게, Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우는 비슷하게, Wrought-Iron Pipe는 작게 산정되었으며, Hazen-Williams 식은 적용된 세 종류의 강관에 대하여 마찰손실이 가장 크다. 즉, C_{HW} 는 적용한 수치보다 큰 수치를 사용하여야 함을 알 수 있고, 보통 관망해석에 적용하

는 110은 상당한 안전율을 포함하고 있어 펌프 용량 및 설치개소 증가로 시공비용의 증가를 초래하는 것으로 생각된다. 그림 2에서 Hazen-Williams 경험계수는 표 3에 제시한 바와 같이 관의 종류에 관계없이 원자료에 의해 적용되어 Hazen-Williams식에 의한 마찰손실수두는 모두 같게 나타났으므로 이를 기준으로 각 식들의 마찰손실수두를 비교하면 강관의 종류를 달리하였을 때 각 식들이 가지는 특징을 알 수 있다.

3.3 펌프의 동력과 관수로

관의 마찰이 위의 예에서 볼 수 있듯이 유량에는 큰 영향을 주지 못하였다. 그러나 각 관로에서 손실수두 h_f 에는 상당한 차이가 있으며, 관로손실은 각 절점에서 압력의 차이를 유발시키고 이 압력의 차이는 실제 관망설계시 펌프의 용량을 결정하는데 상당한 영향을 준다. 그러므로 정확한 관마찰계수의 산정은 필요 이상의 펌프 설치를 막아 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

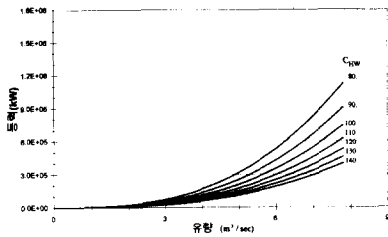
관로에 펌프가 설치되면 유체의 흐름에 에너지를 가해주게 되며 펌프가 단위 무게당 물에 가해주는 에너지 즉, 수두를 E_p 라 하면 Bernoulli 방정식은

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + E_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (9)$$

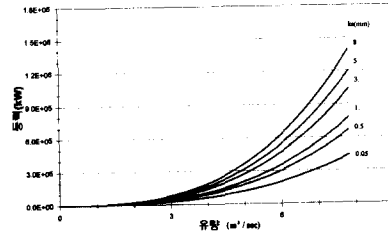
이다. 여기서 첨자 1, 2는 관로계 임의의 두 단면을 뜻하고, h_f 는 마찰손실 수두이고, Z 는 단면에서의 높이이다. 펌프에 의한 에너지의 증가는 보통 동력(power) P 로 표시되고 사용하는 단위는 다음과 같다.

$$P = \frac{\gamma Q E_p}{102.04} = 9.8 Q E_p \text{ (kW)} \quad (10)$$

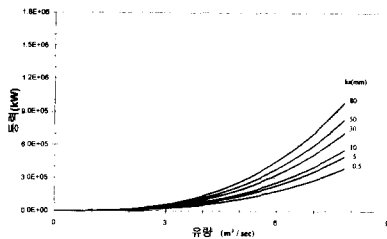
식 (10)에서 MKS(meter-kilogram-second)계에서의 γ 는 물의 단위중량(1000 kg/m^3), Q 는 유량(m^3/sec), E_p 는 펌프의 단위중량당 에너지 혹은 수두(m)로 표시되며 계산된 값은 kW(kilo watt) 단위를 갖는다.



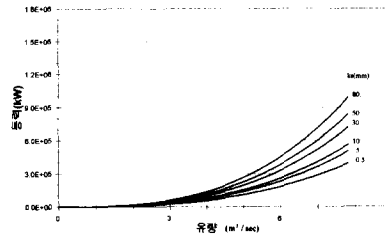
(a) Hazen-Williams 식



(b) Colebrook-White 식



(c) 영점높이 평균법



(d) 마찰계수 평균법

그림 3. 각 식으로 계산된 유량-동력과의 관계

관망해석에서 사용한 4개의 식 또는 방법 (Hazen-Williams, Colebrook-White, 영점높이 평균법, 마찰계수 평균법)을 이용하고 관길이는 1 km, 관경은 1 m로 가정하며 유속을 0~10 m/sec까지 변화시켜 가면서 구한 동력을 유량-동력의 관계를 도시하면 그림 3에 제시된 바와 같다 (영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 거친면의 분포율은 0.2로 가정하였다).

동력과 유량과의 관계를 도시한 그림 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식은 C_{HW} 또는 등가조고 k_s 의 변화에 따라 동력이 상당히 민감한 것으로 나타난 반면, 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 훨씬 덜 민감하다. C_{HW} 가 140~125 정도이면 영점높이

평균법과 마찰계수 평균법의 등가조고는 0.05~5 mm 사이에 있으나, Colebrook-White 식은 0.005~0.3 mm 사이로 추정된다. 또한 C_{HW} 가 80 정도일 때 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 등가조고가 80 mm까지 되어도 동력이 작게 나타나나 Colebrook-White 식의 등가조고는 8 mm 일 때 이보다 더 크게 나타난다. 이상의 결과는 표 2에 의해 계산된 등가조고(표 3 참조)가 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 Colebrook-White 식에 비해 상당히 크게 산정될 수 있음을 암시한다. 여기에 분포율을 고려하여 매끈한 면의 분포율이 크다면 상대적으로 등가조고가 커더라도 손실량이 작게 산정될 수 있음을 의미하며 이때의 마찰계수 분포는 Nikuradse(1932, 1933)의 균일

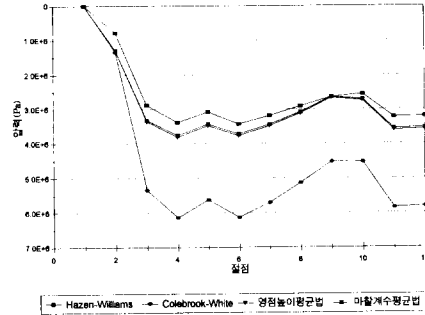
조도 원형관 실험결과와 유사한 형태가 된다.

4. 입력자료의 변화와 절점압력

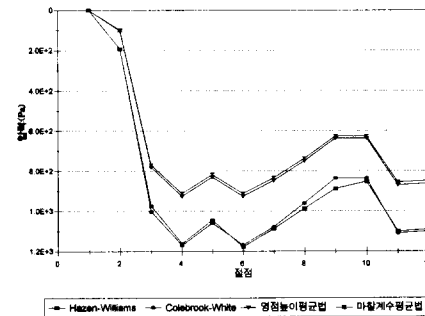
그림 2는 표 3의 입력자료에 의해 관망해석을 수행한 압력변화가 도시되어 있으며, 적용관망의 각 관 즉, Galvanized-Iron Pipe, Tar Coated Cast-Iron Pipe, Wrought-Iron Pipe에 대하여 관경 및 유량의 입력자료를 변화시켜 압력손실을 도시한 결과가 그림 4에 제시되어 있다.

그림 4(a)는 관을 소형관이라 가정하고 원래 관경의 1/10로 가정하였으며, Hazen-Williams 계수, Colebrook-White 식의 등가조고는 적용관망과 같고 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 경우 등가조고는 0.763 mm, 분포율은 표 2에 의해 산정되었다. 같은 Galvanized-Iron Pipe에 대해 소형관과 중형관 즉, 관경을 변화시켜 관망해석을 수행한 그림 2(a)와 그림 4(a)를 비교하면 Hazen-Williams 식은 전자의 경우 다른 식들에 비해 마찰손실이 큰 데 반하여 후자의 경우는 마찰손실이 가장 작다. 이는 Hazen-Williams식이 소형관일 때 압력을 과대 산정할 우려가 있는 것으로 판단되며, Colebrook-White식의 경우에는 그림에 제시된 바와 같이 압력을 과소 산정할 우려가 있는 것으로 분석되었다.

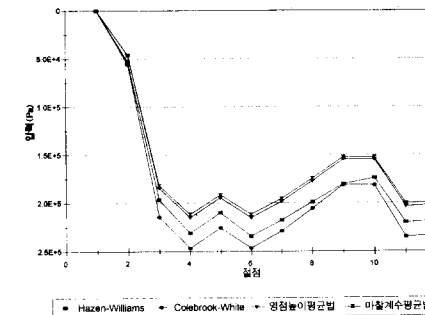
그림 4(b)는 적용관망에 대하여 관경을 7배, 유량을 1000배로한 대형관에 대하여 Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우라고 가정하여 관망해석을 수행한 결과를 도시하였다. Hazen-Williams 경험계수, Colebrook-White 식의 등가조고는 적용관망의 경우와 같으며 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 등가조고 0.63 mm, 분포율은 표 2에 의해 산정되었다. 그림 2(b)와 그림 4(b)는 같은 Tar Coated Cast-Iron Pipe에 대해 중형관의 경우와 대형관으로 구성된 관망에 대한 관망해석 수행결과가 제시되어 있으며, 그림 2(b)의 Colebrook-White 식으로 산정된 마찰손실은 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법으로 산정된 결과와 비슷한데 반해 그림 4(b)의 Colebrook-White 식으로 산정된 결과는 Hazen-Williams 식으로 산정된 마찰손실과 비슷하였다. 이는 Hazen-Williams 식과



(a) 소형관으로 변화시킨 Galvanized-Iron Pipe의 경우



(b) 대형관으로 변화시킨 Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우



(c) 유량의 변화시킨 Wrought-Iron Pipe의 경우

그림 4. 적용예의 입력자료를 변화시켜 계산된 유량-압력과의 관계

Colebrook-White 식은 대형관에 대해 적절히 수리조건을 변화시키는 계수항이 없음으로 인해 마찰손실을 과소 산정하는 것으로 판단된다. 즉, 관경에 따라 등가조고의 변화를 고려할 수 없어 대형관의 경우 두 식 모두 경험계수나 등가조고의 수정이 필요한 것으로 생각된다.

그림 4(c)는 적용관망에 대하여 Wrought-Iron

Pipe의 경우 Hazen-Williams 경험계수, Colebrook-White 식의 등가조고, 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 등가조고와 분포율은 적용관망과 같다고 가정하였을 때 유량을 100배하여 적용시킨 압력변화를 도시한 그림이다. 유량의 변화는 유속을 증가시키는 효과를 가져오며, 이는 각 관의 수리조건을 변화시킨다. 같은 Wrought-Iron Pipe에 대해 유량이 상당히 다른 관망에 대한 해석 결과인 그림 2(c)와 그림 4(c)를 비교하여 보면 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법의 마찰손실이 가장 작으며, Hazen-Williams 식, Colebrook-White 식은 유속이 커지면서 각 관의 수리조건이 변함에도 불구하고 이를 적절히 보정하지 못함으로 인해 마찰손실이 과대 산정되는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

본고는 Hazen-Williams 식, Colebrook-White 식 등의 기존 마찰계수 산정식과 유동훈(1995)의 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의한 상용관 마찰계수 산정식을 간단한 예제에 적용시킨 후 계산된 유량과 압력을 제시하여 위의 네가지 식들이 가지는 특성을 논하였다.

각각의 식들에 적용된 경험계수와 등가조고는 세 종류의 관에 맞게 제시된 자료에 의해 입력되었으며, 관망해석을 수행한 결과는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 비해 압력이 Galvanized-Iron Pipe의 경우는 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식이 과소산정하고, Tar Coated Cast-Iron Pipe의 경우는 네 식이 거의 비슷하게 산정하며, Wrought-Iron Pipe의 경우 Hazen-Williams 식은 과소산정하고, Colebrook-White 식은 과대산정하는 것으로 분석되었다. 반면에 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법은 모든 관에 대하여 산정된 압력변화 또는 마찰손실이 비슷하였다.

Galvanized-Iron Pipe 관망에 대해 관경을 줄여 소형관으로 변화시켜 산정된 결과는 원래 관경에 대해 수행된 결과에 비해 Hazen-Williams 식은 압력을 과대 산정하고, Colebrook-White 식은 압력을 과소 산정하는 것으로 분석되었다. 이는 소형관의 경우 Hazen-Williams 경험계수와 Cole-

brook-White 등가조고는 작게 산정하여야 함을 나타낸다고 할 수 있다.

Tar Coated Cast-Iron Pipe 관망에 대해 관경을 늘려 대형관으로 변화시켜 산정된 결과는 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의한 압력에 비해 원 자료에 의한 경우는 Hazen-Williams 식은 과소 산정하고, Colebrook-White 식은 비슷하였으나, 관경이 증가한 관망은 유량을 증가시킨 경우와 비슷하게 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식은 과소산정하는 것으로 나타났으며 이들의 마찰손실은 서로 비슷하였다. 이로부터 대형관에 기존 마찰계수 산정식을 적용할 때 Hazen-Williams 경험계수는 크게, Colebrook-White 등가조고는 작게 하여야 할 것으로 판단된다.

Wrought-Iron Pipe 관망에 대해 유량을 늘려 관망을 구성하는 각 관에 유속을 증가시키면 영점높이 평균법과 마찰계수 평균법에 의하여 계산된 압력에 비해 원 자료에 의한 경우는 Hazen-Williams 식은 과소산정하고, Colebrook-White 식은 과대산정하는 것으로 나타났으나, 변화된 관망의 경우 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식은 과소 산정하는 것으로 분석되었다. 이로부터 유량의 증가는 관경을 증가시킨 경우와 비슷하게 Hazen-Williams 경험계수와 Colebrook-White 등가조고를 조정해야 할 것이다.

이러한 일련의 분석결과는 Hazen-Williams 식과 Colebrook-White 식이 대형관에서 경험계수 및 등가조고의 선정에 주의를 요한다는 연구결과(Bradley와 Thompson, 1951; Swanson과 Reed, 1963)와 일치하며, 각 관로에 흐르는 유량은 관경에, 압력변화는 마찰계수에 의한 손실량이 주된 영향인자임을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 (주)대우엔지니어링의 1994년도 연구지원에 의하여 이루어진 것이며, 당 회사에 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 유동훈 (1993a). “천이류에서의 관마찰.” 대한토목학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 101-109.
- 유동훈 (1993b). “균일조도 원형관 마찰계수.” 대한토목학회 논문집, 제13권, 제5호, pp. 165-172.
- 유동훈 (1995). “복합면 마찰계수.” 대한토목학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 633-644.
- 유동훈, 강기훈 (1995). “영점높이와 관마찰계수.” 대한토목학회 논문집, 제15권, 제1호, pp. 1-12.
- 유동훈, 원유승 (1995). “상용관 마찰계수.” 대한토목학회 논문집, 제15권, 제6호, pp. 1593-1606.
- 유동훈, 한상호 (1996). “상용관 마찰흐름에 관한 실험연구.” 대한토목학회 논문집, 제16권, 제1호, pp. 1-12.
- 윤용남 (1989). 수리학. 청문각.
- Bradley, M., and Thompson, T. (1951). “Friction factors for large conduits flowing full.” *Eng. Monograph*, No. 7, U.S. Dept. of Interior, Bureau of Reclamation.
- Colebrook, C.F. (1938). “Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws.” *J. Inst. Civil Eng.*, Vol. 11, pp. 133-156.
- Featherstone, R.E., and Nalluri, C. (1988). *Civil engineering hydraulics*. BSP.
- Nikuradse, J. (1932). “Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Stromung in glatten Rohren.” *Ver. Dtsch. Ing. Forsch.*, Vol. 356.
- Nikuradse, J. (1933). “Stromungsgesetze in rauhen Rohren.” *Ver. Dtsch. Ing. Forsch.*, Vol. 361.
- Prandtl, L. (1925). “Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz.” *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 5, No. 2, pp. 136.
- Swanson, H.V., and Reed, M.S. (1963). “Comparison of flow for concrete pipe.” *J. AWWA*, Vol. 55, No. 1.
- Wood, D., and Charles, C. (1972). “Hydraulic network analysis using linear theory.” *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 98, No. HY7, pp. 1157-1170.
- Wood, D. (1980). *Computer Analysis of flow in pipe networks including extended period simulations: User's manual*. Office of Engineering, Continuing Education and Extension, University of Kentucky.

〈접수: 1996년 3월 12일〉